

# 北京大学高平均流强光阴极电子枪驱动激光系统<sup>\*</sup>

鲁向阳<sup>1)</sup> 林林 赵夔 张世文

(北京大学重离子物理研究所射频超导加速器实验室 北京 100871)

**摘要** DC-SC 超导光阴极注入器将直流光阴极电子枪和超导加速腔结合在一起,其特点之一是适合于提供高平均流强电子束.文中介绍了直流光阴极电子枪的驱动激光系统的研制.该驱动激光系统的主机为瑞士 TBP 公司的 GE-100-XHP 型激光器,是采用可饱和吸收镜技术的被动锁模激光器,其工作晶体为 Nd:YVO<sub>4</sub>,输出波长为 1064nm,脉冲重复频率为 81.25MHz,平均功率 10W.该驱动激光系统配套的 CLX-1100 同步控制器可以将激光脉冲与射频参考信号严格锁定,随机抖动不大于 1ps.根据使用要求,作者研制了高效的激光倍频器,获得了大于 1W 的 266nm 紫外激光.同时,激光到光阴极的传输设计中,采用了傅立叶光学技术,在紫外激光功率 650mW 左右的条件下,从自行研制的 Cs<sub>2</sub>Te 光阴极上实现了大于 500 $\mu$ A 的光电流引出.

**关键词** 光阴极 电子枪 驱动激光 同步

## 1 引言

目前,在先进光源研究中能够提供合适的电子束(高峰值流强、低发射度和低能散)的装置,首选光阴极电子枪.因此,尽管光阴极电子枪的设想早在 20 世纪 90 年代已经提出,但是,目前世界上对光阴极电子枪的研究仍然在不断的深入进行.众所周知,驱动激光系统的性能直接决定了光阴极电子枪的束流品质,所以,对于光阴极电子枪的研究而言,除了不断的改进枪的结构、寻找新的光阴极材料等方面以外,对其驱动激光系统的不断发展与完善,也是一个重要的内容.

北京大学目前正在建的 PKU-SCAF 是一个基于射频超导加速器的实验研究平台.超导加速器较之普通加速器的突出特点之一是可以运行在 CW 模式,因此具备提供高平均流强/功率束流的能力.PKU-SCAF 将采用北京大学自主研发的 DC-SC 光阴极注入器<sup>[1]</sup>,从而实现全超导加速系统.本文介绍在 DC-SC 注入器中采用的高平均流强光阴极电子枪的驱动激光系统的研究及实验结果.

## 2 系统简介

DC-SC 光阴极注入器(图 1)主要由光阴极直流电子枪和  $1 + 1/2$ cell 超导加速腔组成.光阴极电子枪由光阴极和皮尔斯型引出极及光阴极驱动激光器构成.其简要工作原理为:光阴极处在对地的负电位,激光投射到阴极表面后随即产生光电子,光电子在静电场的作用下,离开阴极表面进入超导加速腔.根据 DC-SC 的系统设计,驱动激光以垂直方式投射到阴极表面.DC-SC 的主要设计参数见表 1<sup>[1,2]</sup>.

按照上述设计,该直流电子枪的输出平均流强为 5mA 左右.光阴极电子枪的输出流强主要取决于驱动激光的功率与所采用的光阴极的类型.DC-SC 采用 CsTe 光阴极.国际上对 CsTe 光阴极的使用经验表明其量子效率通常在 1%—10%,北大自制的 CsTe 光阴极量子效率也为 1%左右<sup>[3]</sup>.据此,提出对驱动激光的功率要求为 1—2W @ 266nm.另外,为了获得高品质的电子束流,还要求激光脉冲相对于射频相位的随机抖动尽可能小.在 DC-SC 的设计中,要求 Jitter 不大于 1ps.

2004-01-13 收稿

\* 国家自然科学基金(10299021)和国家 973 项目(2002CB713602)资助

1)E-mail:xylyu@pku.edu.cn

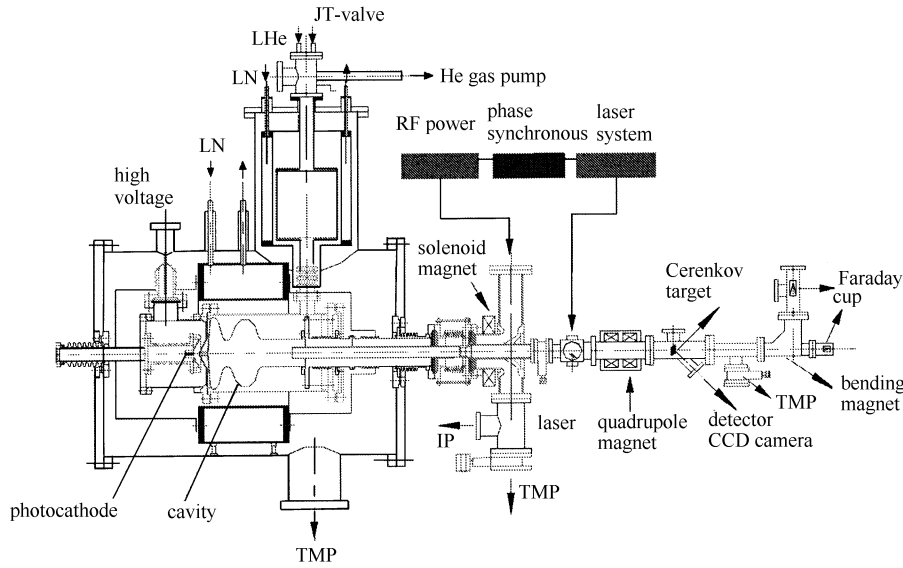


图 1 DC-SC 光阴极注入器结构示意图

表 1 DC-SC 的电子枪设计参数及对驱动激光系统的要求

电子束	束半径	3.0mm	激光波长	266nm
	束团长度	< 10ps	脉冲宽度	< 10ps
	束团电荷量	60pC	激光功率(靶上)	> 1W
超导腔	平均加速梯度	15MV/m	脉冲重复频率	81.25MHz
皮尔斯枪	加速间隙	15mm	Jitter	< 1ps
	阴极电压	-70kV	激光功率稳定性	< 1%
	阳极电压	0V		

归纳起来,DC-SC 的高平均流强光阴极电子枪对驱动激光系统的要求为:短波长、窄脉冲、高平均功率、高稳定性和高同步精度。

### 3 驱动激光系统

驱动激光系统主要包括一台高平均功率激光器、二倍频器、四倍频器和相应的传输系统.激光器为瑞士 Time-Bandwidth Products 公司(简称 TBP)的 GE-100-XHP 型激光器.该激光器为半导体泵浦的采用可饱和吸收镜(SESAM)技术的被动锁模激光器,工作晶体为 Nd:YVO<sub>4</sub>.其工作原理见图 2.泵浦光经过耦合器为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体提供泵浦.Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的泵浦光入射面镀有对泵浦光增透、对 1064nm 高反的膜层,该面形成激光谐振腔的一个端镜.可饱和吸收镜(SESAM)为另一个端镜.腔中的激光通过四分之一波片 QWP-1 调整其极化度,控制腔中的储能与

输出的比例.偏振反射镜 TFP 将光路中垂直偏振部分取出,然后经过 QWP-2 和半波片 HWP 将极化方向转成水平偏振输出.为了使该激光器的脉冲重复频率在一定范围内可调,以实现与参考信号锁定的功能,在激光器谐振腔光路中设计有两个焦点,一是在 M3 处,一是在 SESAM 处.M3 安装在压电陶瓷(PIEZO)上,装载 SESAM 的调整架可以在微动电机(PICO MOTOR)驱动下进行位置调整.

TBP 还提供与该激光器配套的同步控制器,我们选用的型号为 CLX-1100.该控制器对激光脉冲重复频率的控制,采用国际先进的双反馈回路控制法,控制精度可以达到 Jitter < 0.5ps.

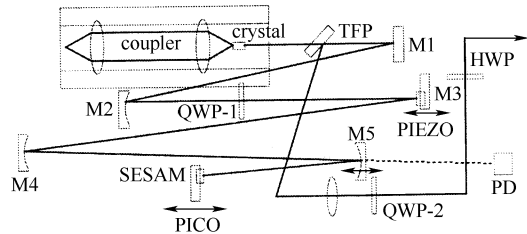


图 2 GE-100-XHP 型激光器工作原理

### 4 高效倍频器

GE-100-XHP/CLX-1100 激光器系统可以提供 1064nm 激光,平均功率为 10W 左右,但是 CsTe 光阴极的工作波长要小于 270nm,因此需要对激光进行

倍频.从 1064nm 到 266nm 需要进行两次倍频.倍频主要的难度在于两点:

(1)高效率.非线性光学理论指出,激光的倍频效率与入射到晶体上的基波功率密度的平方成正比.我们的 GE-100-XHP 的平均功率为 10W,脉冲重复频率为 81.25MHz,脉冲宽度为 10ps.所以激光的峰值功率仅为 12.3kW 左右.尽管目前激光倍频技术已经可以使 1064nm—532nm 的倍频效率达到约 70%,但是这是对 MW 以上激光获得的.低峰值功率是获得高倍频效率的主要难点.

(2)高平均功率.要获得高平均功率的紫外激光主要困难在于倍频晶体的性能.BBO 是人们使用得较多的四倍频晶体,它具有较高的倍频效率,性能稳定不易潮解.但是使用经验表明 BBO 晶体所能承受的最高平均功率仅为 180mW 左右<sup>[5]</sup>.

针对上述难点,经过反复实验研究,研制出高效的激光倍频器.该倍频器的二倍频晶体为 KTP,四倍频晶体为 CLBO.为了提高晶体中的激光功率密度,晶体前均设置透镜将入射光聚焦.CLBO 的特点之一是极易潮解,因此须将该晶体置于高温中.为确保 FHG 稳定可靠工作,我们自制了一个保温炉,炉温设定在 105℃,温度控制精度为 ±0.1℃.由于聚焦会影响光束的传输,所以在光路中采用了傅立叶光学技术.二倍频器为 6F 关系,四倍频器为 4F 关系.通常二倍频器为 4F 关系,但是较强的聚焦容易导致 KTP 晶体损伤,故采用了 6F 关系,将 KTP 晶体内的光腰半径增大一倍,从而功率密度降低 4 倍.虽然损

失了倍频效率,但是系统工作稳定性大大提高.系统装置示意图见图 3.建成的倍频系统,二倍频效率接近 50%,四倍频效率在 20% 左右,总倍频效率为 10% 左右,获得的 266nm 紫外激光平均功率大于 1W.

激光经过倍频以后,由于非线性晶体的走离(walk-off)效应,出射的光斑不再是圆斑,而是一个窄条,这是使用中不希望的.在传输系统中采用了傅立叶传像技术解决这个问题.

关于高效倍频器的详细研究,本文作者有另文描述<sup>[6]</sup>.建成后激光系统的各项参数见表 2.

表 2 高平均流强光阴极电子枪驱动激光系统的主要实验参数

波长/nm	平均功率/W	脉冲宽度/ps
1064	10	9.9
532	> 4.8	
266	> 1	
脉冲重复频率/MHz	功率稳定性(%)	同步抖动度/ps
81.25	< 1,24h	< 0.6

### 5 结论

建立高平均流强光阴极电子枪驱动激光系统的初衷是,在满足加速器系统要求的前提下,激光系统要尽可能简单、可靠,低维护或免维护.TBP 的 GE-100-XHP 激光器可以提供 10W 的平均功率,由于是采用了先进的 SESAM 技术的被动锁模,激光器工作非常稳定,且使用非常方便.由于单台激光器即可满足要求,不必要附加放大器,因此系统的复杂性及造价均大大降低.但是,由于厂家对倍频器的质保指标仅为 180mW @ 266nm,因此本驱动激光系统的最大难点在于获得高效率的倍频器.从使用结果看,我们的倍频器达到了实验要求,并且大于 1W 的平均功率也和美国 JLab 和 BNL 的水平齐平.目前存在的问题主要是 KTP 晶体不能满足长时间(如:长于 1 个月)稳定工作的要求.下一步要开展的研究是在提高倍频系统的稳定性的同时,进一步提高倍频效率.

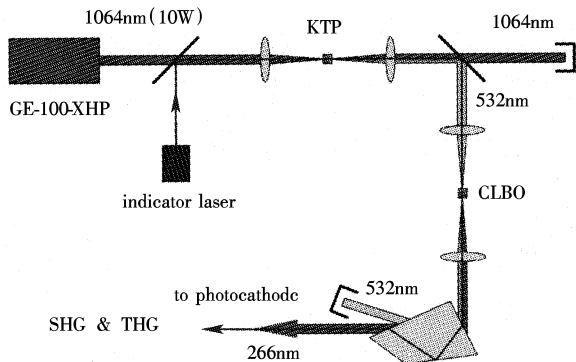


图 3 高效倍频系统工作原理框图

## 参考文献 (References)

- 1 ZHAO Kui, HAO Jian-Kui, HU Yan-Le et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A475**:564—568
- 2 QUAN Sheng-Wen, ZHAO Kui, ZHANG Bao-Cheng et al. DC-SC Injector for High Average Power Free Electron Lasers. In: Proceedings of Second Asian Particle Accelerator Conference. Beijing, 2001. 538—540
- 3 ZHAO Kui, QUAN Sheng-Wen, HAO Jian-Kui et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A483**: 125—128
- 4 XIANG Rong, QUAN Sheng-Wen, LIN Lin et al. HEP & NP, 2004, **28**(7):771 (in Chinese)  
(向荣, 全胜文, 林林等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(7):771)
- 5 Personal Communication with Academician SHEN De-Zhong
- 6 LU Xiang-Yang, LIN Lin, ZHAO Kui et al. High Average Power FHG of SESAM Nd:YVO<sub>4</sub> Laser at 266nm. Sent to: Chinese Optics Letters

## Drive Laser System of a High Average Current Photocathode Electron Gun in PKU\*

LU Xiang-Yang<sup>1)</sup> LIN Lin ZHAO Kui ZHANG Shi-Wen

(RF Superconducting Accelerator Laboratory, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The precept of DC-SC photoinjector is to combine a DC photocathode electron gun and the superconducting cavity together. This scheme is specially adequate to provide the high average beam current. In this paper, authors have described the drive laser system for the DC-SC photoinjector of PKU version. This system is mainly composed of GE-100-XHP laser, a passive mode locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser, CLX-1100 timing controller from TBP, Switzerland, self-developed high efficiency SHG and FHG and laser beam transmission system. After experimental test, the laser power of 266nm is more than 1 W, the jitter between laser pulses and the RF reference signal is less than 1 ps. By use of this laser system, we have observed more than 500 $\mu$ A electron current from Cs<sub>2</sub>Te cathode.

**Key words** photocathode, electron gun, drive-laser, timing

Received 13 January 2004

\* Supported by NSFC(10299021) and National Basic Research Program of China(2002CB713602)

1) E-mail: xylyu@pku.edu.cn